

資源地政学的核燃料サイクル論

A Nuclear Fuel Cycle Strategy Tolerant to Resource-Geopolitical Crisis

2022年10月

小澤正基

東京工業大学名誉教授

ロシア科学アカデミー・フラムキン研究所名誉教授

英国・王立化学会フェロー

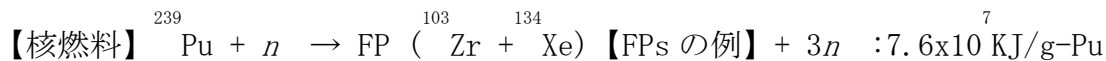
alchemistozawa@mx4.nns.ne.jp, ozawa@nr.titech.ac.jp

【要旨】核燃料サイクルの技術とシステムを資源地政学的視点から論考した。40 元素 400 核種からなる使用済み核燃料 (SF) は、核燃料のプルトニウム (^{239}Pu) やウラン (^{235}U) の他、白金族金属 (PGM)、レアアース (REE) などのレアメタル、核医学用 ^{99}Mo ($\rightarrow^{99\text{m}}\text{Tc}$) などの放射性核種を含有する人工鉱石である。これらは国産の、いわば地政学的リスクフリーの“原子力レアメタル”であり、核燃料サイクルは“原子力マインパーク”である。原子力レアメタルの選鉱精錬法として溶媒抽出法及び UPD (Under Potential Deposition) 触媒による電解採取法を例示し、PGM 及びテクネチウム (Tc) の利用としてアルカリ水及び海水の電解による水素製造触媒への適用例を示した。4 元素 (Pd-Ru-Rh-Re) UPD 電極 及び模擬高レベル放射性廃液から作成した多元系 UPD 電極は単味パラジウム UPD 電極を最大 5 倍上回る高触媒活性を示し、それら UPD 電極ではパラジウムを核とした安定した粒状析出物の大きな比表面積とルテニウムリッチな組成が高触媒活性を担うとした。一方原子炉ではテーラーメイドにレアメタルを創成することが可能である。中性子捕獲・ β^- 崩壊反応に基づいた元素変換効率、生成元素の比放射能及び戦略的価値などの指標において、19 組の元素系よりプラセオジウム (Pr) \rightarrow ネオジウム (Nd), テルビウム (Tb) \rightarrow ジスプロシウム (Dy), テクネチウム (Tc) \rightarrow ルテニウム (Ru), ロジウム (Rh) \rightarrow パラジウム (Pd) の 4 元素系の優位性を明らかにした。資源性 (Resourceability) に基づいた放射性廃棄物のトータルなリサイクル (Recycle) と核種・元素の変性 (Metamorphosis) は既往核燃料サイクル概念にコペルニクスの転回 (Kopernikanische Wende) を促す。原子力レアメタルの社会実装には、戦略的、経済的評価に加え微弱な放射線・放射能への謂れなき忌諱感 (メンタル) の克服が必須であるが、SDGs に向けた自動車産業界におけるネオジウム (Nd)、ランタン (La)、サマリウム (Sm) など天然放射性レアアースの急速な利用拡大がこの新しい地平を切り拓く一つの道標となるのかも知れない。

1. 核燃料サイクルの原典

プルトニウム (^{239}Pu) やウラン (^{235}U) の核分裂反応は炭素 (C) の化学燃焼反応に比べ約 230

万倍のエネルギー密度 (J/g) を与え、その 1g は実に 1~2t の原油に相当する。反応生成物である核分裂生成物 (FPs) 及び炭酸ガス (CO₂) はそれぞれの産業廃棄物となる。原子力は発電にあたりウラン以外の天然資源は消費せず、温暖化の原因となる炭酸ガス放出による環境汚染も起こさない*。



*注 1) 原子炉中では酸化物燃料中の酸素が中性子捕獲反応により放射性炭素 ¹⁴C が生成 (¹⁷O(n, α)¹⁴C)、これが主として再処理の過程で ¹⁴CO₂ として環境放出されるが、放出放射量は地球環境 ¹⁴C 量 (8.5 × 10¹⁸ Bq) に比べて無視しうるほど少量 (3 × 10¹⁰ Bq; 1000MW 原子炉当たり) である。

これが原子力 (核分裂) エネルギー利用の原典であり、経済的にも従来エネルギーと競合するエネルギー源として多くの国での利用が進んできた。もし (1996 年当時の) 原子力発電量を石油で賄うとしたら毎年 5 億トンの石油が必要であったし、逆に全ての火力発電の原子力への置き換えができたとしたならば産廃炭酸ガス排出量を年間 20 億トンずつ減らすことが出来ていたはずで¹⁾、これが継続して実現していたなら今日のような厳しい温暖化と異常気象 (巨大台風など) は軽減されていたであろう。「核燃料サイクル (Nuclear Fuel Cycle)」は原子炉から排出された使用済み核燃料 (SF) から燃え残りのウランや新たに生成したプルトニウムを分離・回収し再び燃焼させるための工学システムをいい、原子炉 (軽水炉、高速炉など) 及び再処理工場はその核心的技術である。プルトニウムの燃焼と増殖が可能な高速炉核燃料サイクルが実現すれば、石油枯渇以降千年に渡るエネルギー源の基盤となりえる。化学的に活性な金属ナトリウム (Na) の取り扱いが難しいが、工学に不可能はない。現に日仏が断念したナトリウム冷却型高速増殖炉をロシアは実稼働させている。腐食や火災・爆発は正に化学・材料の課題であり、現場の化学技術者が奮起しなければ道は開かれない。

【廃棄物管理の新戦略】 廃棄物の管理思想は 1960 年代以降より①希釈→拡散から②濃縮→封入、③貯蔵→④崩壊へと変遷する。化石燃料発電の産業廃棄物である炭酸ガスは 19 世紀から今日までほぼ全量環境に放出されてきたのに対し (即ち、①)、原子力発電の産業廃棄物である核分裂生成物は、核燃料サイクルの黎明期から今日まで気体及び液体共に質及び量的に放出が管理されてきたのは事実である。核燃料再処理の過程では特定の放射性核種について放出基準枠内での環境放出が認められるが (①)、大方は全量が高レベル放射性廃液 (HLW) に濃縮されガラス固化後、深地層処分により生物圏から隔離する方式が取られてきた (②)。核分裂生成物の放射性毒性についてはその約 80% が半減期 100 年以下と短く、直ちに崩壊し安定化する。しかしながら 0.1Wt% 程度含まれるマイナーアクチニド (MA) を始めとして長寿命核分裂生成物 (LLFP; Long-lived Fission Product) は極めて減衰が遅く、ガラス固化後の HLW (1t) の有害度 (放射性毒性) が原料である天然ウラン (約 60t) の毒性と同等まで減衰するのに 100 万年を要する。かように長寿命の毒性を有する廃棄物の処理・処分は、一

般及び放射性を問わず世代間にまたがる課題であり、一般産業廃棄物の PCB など猛毒ダイオキシン類については廃棄物焼却炉の高温処理などの無害化対策が進み、特に平成 16 年(2004 年)以降は大気及び水系共に排出量が激減している(④)²⁾。高レベル放射性廃棄物の処理・処分に関しては当初より進めてきたガラス固化技術開発と並行し、1980 年代後半以降長寿命核種を選択的に分離し原子炉あるいは加速器に再装荷・照射して安定あるいは短寿命核種に核種変換する研究(P&T; Partitioning & Transmutation)が、日本(OMEGA**計画、1988 年)及びフランス(SPIN 計画、1991 年)のような国家プロジェクトレベルに展開された(即ち④の発展型としての分離変換)³⁾。

**注 2) OMEGA: Options Making Extra Gains from Actinides and fission products generated in nuclear fuel cycle

P&T の達成効果としては、全アクチニド(An)の 99.9%及び特定 FPs(Sr, Cs, PGM, Tc, REE, etc)の 90~99%程度を分離することができれば 100 万年の減衰所用期間を数 100 年にまで短縮することができる。分離技術については OMEGA 以降、原理実証レベルからプロセス開発レベルへと展開が進み、工学的スキーム構築の為の経済性評価を除けば *Just-in-time Technology* のレベルまで進んでいる。近年、計画中の商用再処理工場へマイナーアクチニド分離機能を付加する実用化の動きが、仏日に先んじて中国で出てきており⁴⁾戦略的かつ先導的意思決定として注目される。

[廃棄物から資源へ] 原子力は電力生産一辺倒のエネルギーシステムではない。地球的環境汚染を抑制し超長期的なエネルギーを保障するという使命を確実なものにするためには、核分裂生成物≡産業廃棄物の取り扱いを先ず見直す必要がある。使用済み核燃料は 40 元素 400 核種の集合体であり、個々の元素の物理化学特性に応じた産業資源や、核種の放射化学特性に基づいた医療資源とするなどの発想の転換を図らねばならない。日本における放射性同位体(RI)・放射線利用は、2015 年時点でエネルギー利用(54%)とほぼ同等(46%)の経済規模であったが一般国民の認知度は低いのではないだろうか。今日癌診断薬として普遍的に使用されているテクネチウム ^{99m}Tc(濃縮ウラン ²³⁵U の中性子照射で生成したモリブデン ⁹⁹Mo を輸入する)や、癌治療、滅菌処理及び非破壊検査に広い用途のあるコバルト(⁶⁰Co)さえも全量輸入に依存している。放射性物質・放射線被ばくに纏わる国民の忌諱感は異常なほど大きく、例えばレアアースは産出国でのウラン及びトリウム(Th)の放射性物質の除染後でないと輸入できない。コロナワクチン(COVID-19)についても同様だが、製造や取り扱いが厄介な放射性同位体(RI)や放射性医薬品はこれまで必要量輸入すればよいとしてきたが、この平時の論理がいつまでも通用するはずもない。2009 年 5 月カナダの RI 製造用原子炉が故障し、^{99m}Tc の原料である放射性 ⁹⁹Mo の輸入が長期間途絶えたときの日本の癌治療現場の混乱は記憶に新しい。その時は南アフリカの原子炉で生産した ⁹⁹Mo をパリ経由で空輸して難を逃れたが、⁹⁹Mo の半減期は 66.0 時間と短いため日本各地の病院で患者に供されるまでにはかなりの量が減衰してしまった。エネルギー及び医療資源分野の安全保障策として一刻も早く有用元素・RI の自給化に取り掛かからないといつまでも禍根が続くことになる。核燃料サイクルの放射性廃棄物は従来の「処分」一辺倒から戦略的「利用」へとミッションを転

換する時にきている。半世紀前の1970年J.O' M. Bockrisは、水素をエネルギー媒体として原子力及び太陽光を組み合わせた水素経済社会を究極のエネルギーシステムとして提案している⁵⁾。この水素経済システムでの最大の課題は水素製造であるとして電解法や放射線分解法の可能性を指摘しており、電解法では貴金属電極触媒の代替触媒が無いことが課題であるとした。本論考では核燃料サイクル・放射性廃棄物中の白金族金属(PGM)が現行の代替電極触媒となるかを試論するが、セシウム(¹³⁷Cs)を含む高レベル放射性廃液自身の放射線分解でも水素製造が可能であることを付け加えたい。

2. 原子力マイクパークとしての核燃料サイクル

[元素の資源地政学] 偏在した資源の独占とそれへのアクセスを巡る国家間の競争は、産出国のプレゼンスや外交力を高めるための地政学上の有力な武器となっている。図1は地殻を構成する資源元素の対ケイ素(Si)の相対的頻度である⁶⁾。重元素になるほど存在率は減少し、銀(Ag)からはほぼ一定となるものの、存在のバラツキは大きくなる。白金族金属は”Gamow線”の下方に大きくずれる最稀少元素である一方、上方にずれているレアアースは稀少性よりも偏在性が問題となる。軽・重レアアースはSDGs向けの先端産業に不可欠な金属資源となっているがその生産の95%を中国が占めている(2010-2014年平均)。白金族金属についてはパラジウム(Pd)の46%をロシアが占め、ロジウム(Rh)の83%及びルテニウム(Ru)の93%は南ア一国のほぼ独占状態にある⁷⁾。ちなみにSDGs燃料電池触媒として重要な白金(Pt)についてもロシアのシェアは12%と高い⁸⁾。1982年の南巡講話で鄧小平は「中東有石油 中国有希土」とレアアースを石油のような資源武器として扱うと宣言、2010年9月の尖閣紛争では日本へのレアアース禁輸の挙に出ている。2022年2月に始まったロシアによるウクライナ侵攻戦争では、石油に加え天然ガスもNATOを揺さぶる資源武器となっている。それに先立つ1992年、千島列島択捉島北部のクドリャブイ火山(茂世路岳)の噴出ガスから最稀少元素であるレニウム(ReS₂として)が発見され年間約500Kgの生産が可能との報道がなされた(2003年)。このガスにはレニウム13%の他、ゲルマニウム(Ge)34%、インジウム(In)45%及び金(Au)4%など有価元素が含まれるとされる⁹⁾。レニウムはMiG戦闘機のジェットエンジン用耐熱合金の素材として注目される戦略的に最も重要な元素である。北方領土にこのようなレアメタルが豊富に存在することは、日露間の領土返還交渉におけるロシア側の論拠の一つであろう。図中示したように、高レベル放射性廃液(使用済み核燃料)には原子番号34セレン(Se)～原子番号66ジスプロシウム(Dy)までの核分裂生成物レアメタル(以降、原子力レアメタルと総称す)が有意量分布し、白金或いは金は存在しないものの、白金族金属のルテニウム、ロジウム及びパラジウム量は一般鉱石と比べた場合においても高品位である。同様にⅦ族のテクネチウムは地球上には存在しない放射性元素であり、もし物理化学的特性が同族レニウムと類似したものであるならば、レニウムの代替金属としてその資源地政学的価値を軽減することができるはずである。因みにレニウムも半減期4.5x10¹⁰年の長寿命放射性核種¹⁸⁷Re(β^-)を62.60%含むため、天然の放射性元素である。一般に資源国ほど地政学的な資源戦略や枯渇に敏感である。例えば2021年中東のUAEは、OPEC加盟国中第三位の産油国でありながら、アラブ諸国初の原子力発電所を運開させている。2018年筆者はロシ

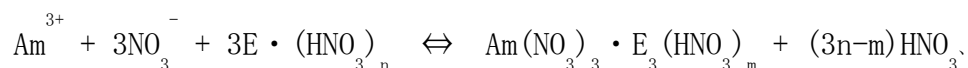
ア人科学者と共著で、原子力レアメタルの分離と利用技術の現状をまとめたモノグラフをロシア D. I. メンデレーエフ大学から上梓している¹⁰⁾。

【原子力レアメタルの本性】 使用済み核燃料に含まれる 40 元素 400 核種の内、31 鉱種が原子力レアメタルでありそれらの核分裂収率は原子番号に対し凸型である。例えば標準的軽水炉使用済み燃料（燃焼度 33GWd/t, 3 年冷却）1t には、ウラン 955Kg、プルトニウム 10Kg、マイナーアクチニド (MA; Np, Am, Cm) 0.7Kg に対し、核分裂生成物は 34Kg 含まれる。その内、レアアースはプルトニウムとほぼ同量の 10Kg、白金族金属 (Ru, Rh, Pd) は 4Kg、テクネチウム 1Kg、モリブデン 3Kg、カルコゲン (Se, Te) 0.7Kg と豊富である。核分裂生成物の生成量は燃焼度に比例して増加するので高燃焼度高速炉使用済み燃料の場合更に増え、パラジウムやロジウムは天然鉱石に比べ 1 千倍以上の高品位となる。いわば使用済み核燃料・高レベル放射性廃液は「原子力鉱脈」であり、核燃料サイクルは「原子力マインパーク」と称して過言ではない。これら原子力レアメタルの生成量は原子力発電電力量と炉型・燃料及び再処理能力に依存している。例えば 50 年後の 2070 年、我が国の原子力発電設備容量を 50GWe (GWe=100 万 KW)、軽水炉のリプレイスで導入された高速炉が軽水炉と共存するとして、第二民間再処理工場 (1000tSF/d 程度) 他において回収率 99.5%にてレアメタルを分離する場合、約 9t のネオジムを含む年間 23t のレアアースと 10t の白金族金属 (ルテニウム; 約 5.4t、ロジウム; 約 1.1t、パラジウム; 約 3.8t) の回収量が試算されている¹¹⁾。これらを 2006 年の国内需要量と比較すると、ロジウムについては約 40%、パラジウムについては約 7%に相当し、ルテニウムについてはほぼ全量を賄うことができる。図 2 は高速炉使用済み燃料 (MOX 燃料内炉心, 燃焼度 150GWd/t) 1t に含まれる各元素の放射能 (Bq) の経時変化を示している¹²⁾。炉停止時には全ての元素は放射性であり放射能は核種固有の半減期に応じ減衰する。白金族金属については、高放射性ではあるが半減期が 1 年程度で極めて短寿命のもの (Ru, Rh)、長寿命ではあるが放射性毒性が低いもの (Pd, Tc) に二分される。因みにパラジウムの放射能は長寿命 ¹⁰⁷Pd (半減期 6.5×10^6 年) に起因しており、もし安定 Pd で 30 倍以上希釈するならば IAEA が定めた BSS (国際基本安全基準) 規制免除レベルをクリアすることができるはずである。また Ru の放射能は ¹⁰⁶Ru に支配され冷却後 40 年で、また Rh は ¹⁰²Rh に支配され 80 年でそれぞれの BSS レベルをクリアする。モリブデン、インジウム及びジスプロシウムの比放射能 (Bq/g) は 5 年冷却後の取り出し時にはほぼゼロ (非放射性) にまで減衰しており分離直後から工学利用を見通すことができる元素群である。ランタン (La) 及びネオジム (Nd) の比放射能はそれぞれ 0.001 (Bq/g)、0.01 (Bq/g) となっており、共に天然のランタン及びネオジムが持つ放射能レベル以下である。比発熱量 (Watt/g) に関してはマイナーアクチニドのキュリウム (²⁴⁴Cm) が 2.25 (Watt/g) と特段に高く、ストロンチウム (⁹⁰Sr) などと共に熱源としての利用に有利である。因みにアポロ宇宙船では約 4Kg の二酸化プルトニウム (²³⁸PuO₂) が、カッシーニ土星探査機では約 33Kg がアイソトープ電池 (RTG) として用いられており、深宇宙探査機の唯一の熱・電源として実用化されている。都市鉱山についてのコンセプト“混ざればゴミ、分ければ資源”は原子力鉱脈にこそ当てはまる。都市鉱山はエレクトロニクス製品ゴミ中のレアアースを主な対象としてエントロピーが極限的に拡大した

社会的条件下での分別回収であるのに対し、原子力鉍脈のレアメタルは、高品位ではあるが高レベル放射性廃液中に共存する強烈な放射能、特にアクチニド (4, 5f 元素) との相互分離が最大の制約となる。次に原子力レアメタルの分離・利用及び元素変換を概略する。

3. 原子力レアメタルの元素戦略

[MA・レアアース分離技術] 再処理工程で使用済み核燃料は硝酸により大方が溶解し、PUREX 抽出剤 30%TBP (Tri-*n*-Butyl Phosphate) /*n*-dodecane でウラン (UO₂²⁺) 及び プルトニウム (Pu⁴⁺) は抽出されるのに対し、核分裂生成物は一部 RuNO³⁺, Zr⁴⁺などを除き、非抽出性であるため 3 価マイナーアクチニド (MA³⁺) とともに高放射性抽残液 (HAR) に排出される。未溶解分は不溶解残渣となるが清澄後、高レベル放射性濃縮廃液に纏められる。半減期 432.2 年のアメリシウム (²⁴¹Am) などマイナーアクチニドは長期に亘り高放射性廃棄物の放射性毒性を支配する。高放射性抽残液からの MA³⁺の分離研究は TBP 以上に抽出能の優れた抽出配位子を創出する方向で進められ、70 年代初頭ごろから単座配位子 (DIDPA, DBBP, TRPO; 第一世代型抽出剤)、80 年代後半辺りから二座配位子 (DIAMIDE, CMPO; 第二世代型)、さらに多座配位子 (TODGA 他; 第三世代型) へと進んでいる。CMPO-TRUEX 法については 3 つの CMPO 分子 (E) が MA³⁺ (Am³⁺) と硝酸根 (NO₃) の中性イオン対をキレート抽出することで進むが、



$$\text{E: } 0 \leq [iB] \text{CMPO}, n+m \leq 5,$$

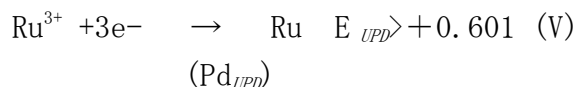
Ce³⁺などの 3 価レアアースも共抽出される。本法の主な利点は、CMPO 分子内の P=O ドナーが MA³⁺を、C=O ドナーが競合する H⁺の抽出を受け持つメカニズムにより廃液の硝酸濃度 (2.5~3M HNO₃) を希釈しなくて済むこと、CMPO に相改質剤として TBP を混合することにより抽出錯体の溶媒和が増し第 3 相生成を抑制できる点である。また CMPO は生物学的毒性が低く取り扱いが容易であり、火災・爆発に対する安全性も高い。本法では高放射性抽残液中の >99.9% の ²⁴¹Am³⁺を含む全 α 核種の回収が実証されている。90 年代以降原子炉 (核変換) と燃料サイクル (分離) の整合性が検討された結果、中性子捕獲により炉心性能を低下させる振る舞いをするレアアース (4f 元素) の除染がマイナーアクチニド (5f 元素) の核変換における最重要課題であることが認識され、N 原子や S 原子などのソフトドナーを有す配位子 (DTPA, TPTZ, TPEN, Cyanex301 など) による両イオングループ間の僅かなソフト性の違いを利用した Inter-group 分離研究が進められた。例えば水溶性 DTPA を TRUEX 法に組み合わせた SETFIX 法ではレアアースの約 80% が除染され、Cyanex301 では pH3.4 の条件での高分離係数 SF_{Am/Eu} 約 6,000 が確認された¹³⁾。イオン交換法については、3 級ピリジン樹脂による実照射済み核燃料溶解液を用いた分離結果¹⁴⁾として、マイナーアクチニド (²⁴¹Am) 製品に対するレアアース (¹⁵⁵Eu) の分離係数; SF_{Am/Eu} > 100,000、Am 純度; (¹⁴⁴Ce, ¹⁵⁵Eu) / ²⁴¹Am < 0.3ppm、更にキュリウム (²⁴³Cm) との Intra-Group 分離においても分離係数; SF_{Am/Cm} > 2,200 を実証している。イオン交換樹脂法は少量のスループット下における精密分離に優れているが、再処理工程に組み込む場合は硝酸環境との整合をとる必要がある。本論考の主題であるレアアース (4f 元素) を製品とする場合においては、アクチニド (5f 元素) の高除染が更に重要であ

り、大量スループット下の分離に優れる向流多段溶媒抽出法にイオン交換樹脂による精製を組み合わせたハイブリッド分離法が有望と考えられる。

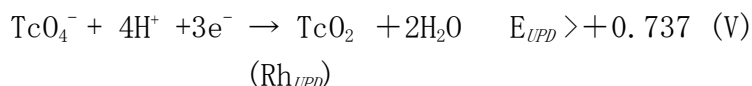
〔白金族レアメタルの分離回収と利用〕原子力レアメタルの分離についてはオメガ研究の当初より、イオン交換法、吸着法、沈殿法及び電解採取法¹⁵⁾など諸法による検討が進められた。電解採取法によるパラジウムの分離は、



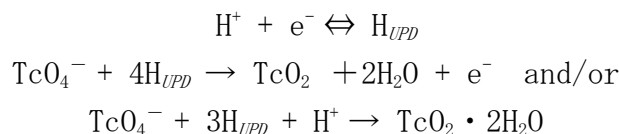
と極めてシンプルで、基本的に化学試薬は必要としないので放射性二次廃棄物は発生しない。また酸性溶液中では電気化学的に卑な 4f 及び 5f イオンは共析しないので、Pd 製品の α 汚染はなく実用化に向け極めて有利な方法といえる。再処理技術を元素戦略的視点で見直し、Adv.-ORIENT Cycle (ORIENT: Optimization by Recycling Instructive ElementS)^{16), 17)} 構想及びその要素技術を国家基幹技術（一般会計 FBR サイクル技術）として提案した。研究の当初、白金電極上に Pd^{2+} から析出した Pd_{UPD} が、 Ru^{3+} など難電析 PGM 及び TcO_4^- の UPD (Under Potential Deposition; $E_{\text{upd}} - E_{\text{eq}} > 0$) を著しく促進する現象を見出し、これを触媒的電解採取法 (CEE: Catalytic Electrolytic Extraction)^{18), 19)} として高レベル放射性廃液からの白金族金属分離に適用した。回収したパラジウムあるいはロジウムを再び UPD 触媒イオンとしてリサイクル添加して、最終的にテクネチウム及び白金族金属 3 種含む計 7 種のレアメタルを回収する方法である^{20), 21)}。



興味深いことに Rh_{UPD} もまた Ru^{3+} の他、 TcO_4^- や ReO_4^- の UPD も促進する。



テクネチウム酸化物の析出域は白金電極の水素吸脱着電位域 (0.4 ~ -0.05V vs. NHE) と一致したことから、電極表面での H_{UPD} による TcO_4^- の還元反応も寄与しているものと考えられる²²⁾。



ここで溶液の硝酸濃度を 3M から pH4 に脱酸すると Pd_{UPD} がなくてもテクネチウムの析出は促進されるが、高レベル放射性廃液を母液とする場合は微量共存する Pu^{4+} が重合沈殿する危険性があるので絶対に避けなければならない。なおルテニウムやテクネチウム、レニウムには他イオンの UPD 促進効果は見られない。模擬高レベル放射性廃液 (0.5M HNO_3 に希釈) の定電流電解では、酸化還元電位の貴なパラジウム及び銀 (Ag) の回収率は >85%、セレン (Se) は >50% に達するが、ルテニウム、レニウム及びロジウムは 10~20% に留まる²³⁾。しかしながら 4 元系 (Pd, Ru, Rh, Re) 混液からの UPD 電解採取法では格段にそれらの回収率が高まり、例えばルテニウムについては >40%、レニウム >55%、ロジウム >25% の回収が確認されている²²⁾。また長寿命核分裂生成物のテルル (Te) も本法で回収できる。

通常 UPD 金属で修飾した電極の触媒活性は増大する²⁴⁾。Pd_{UPD}が関与する UPD では凝集粒状の、樹脂状に比べ安定した混合析出物が得られる。この UPD 電極をアルカリ水 (1M NaOH) においてカソード分極したときの、-1.25V (V. vs Ag/AgCl) におけるカソード電流値 (mA) と見かけの水素発生電位 (ϕ_{Hinit} : V vs. Ag/AgCl) の相関を図 3 に示す^{22, 25, 26)}。2 元系 UPD を除く UPD 電極のカソード電流値は、

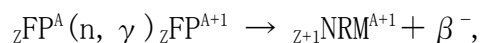
Re~Rh < Pd~Pt (Smooth)~Tc < Pt (Black) < Ru < 4 元系 Pd-Ru-Rh-Re~多元系、順に大となり、4 元系 Pd-Ru-Rh-Re 及び多元系 UPD 電極の水素発生量 (カソード電流値) は単味 Pd UPD 電極の 4~5 倍、人工海水では約 2 倍に達している。また見かけの水素発生開始電位も、

Re~Rh~Pd < Pt (Smooth) < Pt (Black) ~Tc~Ru < 4 元系 Pd-Ru-Rh-Re~多元系、の順に貴にシフトしており、ルテニウムが析出或いは共析した UPD 電極 (Ru 単味, 4 元 Pd-Ru-Rh-Re, 多元系) の高活性を支持している。Tc UPD 電極のカソード分極にともなう電流値の増加は非常に緩慢で-1.25V におけるカソード電流値は、水素発生開始電位がほぼ同じ Ru UPD 電極の 1/2 程度であった。Tc UPD 電極の反応過電圧が大であることは酸性溶液中における白金族金属及びテクネチウムの水素過電圧 η (mV)²⁷⁾ の傾向、

Pt~Pd < Rh, Ru < Re < Tc、

とは矛盾しないが、他に比べ特異な分極挙動は酸化物形態に由来するのかもしれない。4 元系 Pd-Ru-Rh-Re (Tc) UPD 電極ではパラジウムが結晶核となった安定した粒状析出物の大きな比表面積とルテニウムリッチな組成が高触媒活性をもたらす。模擬高レベル放射性廃液から得た多元系 UPD 電極も 4 元系 UPD 電極とほぼ同等の活性であったので³⁸⁾、共析する 5 元素 (Pd, Ru, Rh, Re 又は Tc) 以外の UPD 金属種が活性に及ぼす影響は小さいものと考えられる。Bockris が唱えた原子力と水素の両エネルギーをブリッジするエネルギーシステムに放射性廃棄物を触媒に用いた水素製造システムが整合するかは実放射性廃液を用いた UPD 電解採取並びに実海水電解による証左が必要となろう。UPD 電解採取では α , β , γ 放射線やラジカルの影響の有無がポイントとなり、工学利用の可能性を広げるためには UPD 白金族金属及びテクネチウムの相互分離技術が望まれる。テクネチウムの工学規模の利用については我が国では未踏の分野である。ロシア科学アカデミー・フラムキン研究所は 1978~1983 年にかけてテクネチウム (⁹⁹Tc; 半減期 21.3 万年) の β^- 放射を利用した非熱変換型 RI 電池を開発したとされるが詳細は不明である。

[原子炉を利用する新レア金属の創成] ルドルフ 2 世が統治した 16~17 世紀の神聖ローマ帝国プラハでは、錬金術 (ALCHIMIA) 即ち“化学”による元素変成 (METAMORPHOSIS) が隆盛したが、結局は夢に潰えた。前述の Adv. ORIENT Cycle が放射分離化学に基づく元素戦略構想であったのに対し、核分裂生成物を核物理的手法によって元素変換し、放射能が大幅に低減あるいは消滅した生成元素を資源として利用する構想を【Après ORIENT】として提唱した²⁸⁾。その要諦は高速炉ブランケット部にターゲット核分裂生成物 FP (${}_Z\text{FP}^A$) を装荷、大量の余剰中性子により中性子捕獲反応、



を生じせしめレアメタル (${}_{z+1}\text{NRM}^{A+1}$) を得る。この所謂テーラーメイドのレアメタルは、これまでの長寿命核種の核変換処理において ${}_{z}\text{FP}^A$ の減少 (核変換率) が重要であったのに対し、生成レアメタル ${}_{z+1}\text{NRM}^{A+1}$ の収量や属性、放射化学特性が重要となる。核変換率は中性子エネルギーの関数である中性子捕獲断面積 σ (E) と中性子束 ϕ (E) の積 $\sigma \cdot \phi$ に比例するが、 σ (E) は物理的固有値なので、中性子束 ϕ (E) のみ人為的制御可能因子となる。このためには原料ターゲット ${}_{z}\text{FP}^A$ の $\sigma \cdot \phi$ が生成レアメタル ${}_{z+1}\text{NRM}^{A+1}$ の $\sigma \cdot \phi$ より大きくなるようなエネルギー依存中性子束 ϕ (E) 条件を見出す必要があり、適切な中性子減速材の選択が重要になる^{23,29)}。減速材としては減速能力の大きい軽核種だけではなく、高い共鳴散乱断面積を持ち特定のエネルギーのみ減速させることのできる中・重核種の選定とそれらの組み合わせがポイントとなる。18種の核分裂生成物についての核変換シミュレーション評価を表1に示す²⁹⁾。ここでは変換率 A (%/y)、放射能低減率 B (-)、生成レアメタル ${}_{z+1}\text{NRM}^{A+1}$ の比放射能 (Bq/g) の数値指標の他、日本におけるレアメタルの供給リスク並びに米 DOE が示す資源地政学的供給リスクを組み合わせで評価している。A>1%/y、B<1/100 及び生成レアメタルの比放射能が BSS 免除レベル EL を下回るに要する時間 C<5年を満足値と置くと、

Pr→Nd (@ FBR), Tb→Dy (@ FBR), Tc→Ru (@ FBR), Rh→Pd (@ LWR)、

の4系の元素変換は A, B, C 全ての指標を満足する。なお核分裂生成物ではないがタングステン→レニウム (W→Re)³⁰⁾ は指標 A 及び C を満足し、軽水炉のバーナブルポイズンであるガドリニウム (Gd) が中性子捕獲する際生ずる Gd→Tb→Dy³¹⁾ の元素変換も有望と考えられる。この中性子捕獲反応による元素変換の検証^{32),33)} に向け、カリフォルニア大学アーバイン (UCI) の TRIGA 炉を用いた先行照射実験を行っている。ちなみに Tc→Ru については、2004年ぐらいからロシアの RIAR (ディミトロフグラード原子炉研究所) の High Flux Reactor に於いて金属テクネチウムの中性子照射による安定ルテニウムの生成実験が行われている³⁴⁾。

二つの元素戦略を統合したコンセプトを図4に示す⁶⁾。Adv. ORIENT cycle 構想では高レベル放射性廃液から、比放射能 10^{-2} Bq/g 以下の極低あるいは非放射能レアメタルであるモリブデン、インジウム、パラジウム及び一部レアアース (ランタン (La), ネオジウム (Nd), ジスプロシウム (Dy) の6鋼種【一次原子力レアメタル】を分別的に抽出し、社会に供給する。比放射能 10^8 Bq/g 以上の極高放射性のレアメタルは再度原子炉に再装荷し、ルテニウム、ロジウムなどの高価値・低放射能レアメタル【二次原子力レアメタル】に元素変換後、それぞれの BSS 免除レベルに応じた利用先に供する。ターゲット FP (${}_{z}\text{FP}^A$) 及び生成レアメタル (${}_{z+1}\text{NRM}^{A+1}$) の分離法としては3節の方法が有効であるが、それ以外例えば ${}^{137}\text{Cs}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ の分離にはゼオライト吸着材や大環状化合物樹脂によるイオン交換法などが可能である。社会実装に向けての分離・精製には各単位操作の特徴に合わせた合理的組み合わせが必須となるが、ゴミを分別処理するのに結果としてゴミ (放射性二次廃棄物) が増えるのは本末転倒である。分離プロセス構築にあたってはグリーン・ケミストリーや、高速炉再処理研究で培った、非 Na で C, H, O, N 元素のみで構成される化学試薬と *In-situ* 電解プロセスを組み合わせた Salt-free 技術³⁵⁾ が有効であろう。

4. 核燃料サイクルのコペルニクスの転回

[安全保障力としての原子力・核燃料サイクル] 南欧や米では異常熱波による広域な山火事が頻発し、日本では線状降水帯などによる風水害が続いている。2022年夏、温暖化ガス排出に起因すると考えられる環境悪化は極限に達した感がある。このような惨状下においても人類は化石燃料（石油、石炭及び天然ガス）エネルギーの呪縛から逃れることができない。それどころかウクライナ侵略戦争ではロシアはドイツなど NATO 諸国に対し、天然ガスの供給遮断を恫喝に用いている。2015年に始まった SDGs 運動は太陽光発電など再生可能エネルギーへの傾斜を強く促すが、原子力エネルギーを否定するものではない。しかしながらドイツは電力不足が懸念される中でも一度決めた脱原子力の流れを変えることはないであろう。日本の電源構成（2020年度）における化石燃料依存率は75%を超え、原子力の割合は僅か3.9%に過ぎない。それにも係わらず原発再稼働への足踏みは続き、六ヶ所再処理工場の運開については再延長が繰り返されるばかりである。長期間の停止は施設設備の劣化・損傷を招き組織体制の脆弱化を引き起こす。一方、主要国の内米国、フランス、ロシアなどは原子力を維持・推進し、アジアでは原子力は“中国の宝、ベトナムの夢”と言われて久しくイラン、UAEのほかサウジアラビアなど中東でも原子力導入計画が進む。“エネルギーの他国依存がある限り一国の独立はあり得えず、国民生活の発展、福祉の向上もない”とのフランスの政策³⁶⁾は終始一貫ブレないように見える。これはキュリー夫人以降の“原子力開発における旗手の座は他国には明け渡さない”という矜持の所以であろう。易しい化石燃料発電は開発途上国に残し、難しい核燃料・先端エネルギーは先進国が受け持つ分担論もこれまで一定の説得力を持ってきた。この文脈では、長期停滞が続き将来的には脱原子力（fade-out）に向かう日本は既に主要先進国から脱落しつつあるといえる。ところで、原子力を民生利用している国、とりわけ再処理能力（即ち、プルトニウム分離技術）を保有する国は潜在的核保有国であって、核兵器を実保有しないまでも少なくとも敵対国になんらかの疑念を抱かせること自体抑止力になりうるという安全保障の捉え方¹⁾がある。さらに核分裂生成物（¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr など）を通常爆弾に混ぜれば、破壊力は小さいが相手に対して心理的、社会的ダメージを与える“放射化学兵器”となり、核兵器使用に対しての一定の抑止効果はあるとされる。ウクライナ侵略戦争では、ロシア軍がウクライナの原発を占拠しているが、核攻撃に対する報復兵器としての放射化学兵器の製造を恐れたためではないか。一般論として国家力はA[領土、人口、経済力、防衛力] x B[戦略、意思]の函数とされるが、さらに C[資源・エネルギー]や[食料]の因子も加えるべきであろう。C因子と[情報]を制するものは世界を制すとのテーゼがある。ちなみにロシアはA・B・Cが強大にして[食料及びエネルギー自給率]も130%を超えており一見「富国強兵」を達成したかに見える。加えて世界で唯一ナトリウム冷却高速増殖炉を稼働させ、Akademik Lomonosov と呼ばれる海洋浮揚型原子力発電所を実用化したことにより、数十年～百年内に訪れる石油文明の終焉に向け着々布石を打っているようにも思われる。大地震・津波被災国日本こそ浮揚型原発を導入するメリットは大きい。津波による福島第一原子力発電所事故や放射性廃棄物処分に対する社会的不受容さだけを捉え、これまで築き上げた原子力・核燃料サイクル（プルトニウム）を放棄するようなことになれば国家力をさらに衰弱させる方向に突き進むことになることは間違いない。

[創資源型核燃料サイクルへ] 破壊的地球温暖化や資源の枯渇・占有がもたらす危機的状況は Autophage (自食) と Struchian (ダチョウ) の二つに比喻される⁵⁾。ダチョウは危機の際頭を砂に突っ込んで、迫りくる危険を直視しない人々の象徴で、危機にまるで気が付かない(ふりをする)タイタニック号の乗客に例えられる。市民感情が政策を支配するようなダチョウ国家では破滅的状況が切迫してもそれを打破する発想の転換や技術革新は起こりそうもない。核燃料のウラン、プルトニウム及びマイナーアクチニドのリサイクルに加え、高レベル放射性廃棄物から白金族金属やレアアースを取り出し利用する。更に高速炉では中性子捕獲反応を利用したテーラーメードのレアメタル創成を行う。これは核燃料サイクル概念のコペルニクスの転回 (Kopernikanische Wende) を意味する。天然のレニウム始めレアアースのランタン、ネオジウム、サマリウム (Sm) 及びガドリニウム (Gd) は、元来放射性であるにも関わらず図 5 に示すようにハイブリッド電気自動車など SDGs 自動車産業などで広範に用いられ使用は更に拡大する。レアアースや RI の核医学利用などが進み微弱の放射能・放射線に対する過剰の恐怖心・トラウマが克服されるなら、資源地政学的リスクのない原子力レアメタルが天然資源を代替する時が来るかもしれない。資源性 (Resourceability) に基づいた放射性廃棄物のトータルなリサイクル (Reuse) によって、放射性廃棄物の最終処分上のリスク (Risk) も減らすことができよう。

本論考の結論は、使用済み核燃料 (原子力鋳脈) からプルトニウム及びレアメタルを抽出することのできる“多機能再処理”と、エネルギー及びテーラーメードレアメタル・RI を生産・創成することのできる“多目的炉”から成る先進的核燃料サイクルの実現である。多くの Apollo 探査船が持ち帰った 300kg 以上の月面岩石サンプルには”Kreep”と称される元素群 (カリウム (K)、レアアース (REE)、リン (P)) が含まれ、最近の月面センシングによれば核燃料物質のトリウム (Th) (及びウラン) が特に表側に偏在していることが明かにされている³⁷⁾。“耕雲種月”のごとく、米中の宇宙開発戦略が月面の核燃料やレアアース資源 (宇宙鋳脈) まで視野にいれているとしたら、これまで述べてきた原子力鋳脈の方が実用化までの道程ははるかに容易であろう。五言絶句”登鶴鵲楼“

“白日依山盡 黃河入海流
欲窮千里目 更上一層樓”

は千里先を見極めるためには更なる高みに昇らなければならないと解される。旧西ドイツは 1990 年の東西統一の際、商用核燃料サイクル計画を放棄させられた。幸いなことに非核保有国の中で日本だけが核燃料サイクルを保有し続けられている。千年先までの地政学的リスクフリーのエネルギーとレアメタル資源を確実なものにするためには、サイクル概念のコペルニクスの転回とそれを支える技術・システムの高度化が急務となる³⁸⁾。

中東有石油 中国有希土 日本創資源

謝辞 本論考執筆を進めるにあたり、渡辺政廣山梨大学名誉教授、若林利男東北大学名誉教授、横山次男元東京工業大学特任研究員の三氏には有益な議論を賜りました。ここに深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) ジャック・アタリ, 「核という幻想」, (株)原書房, 1996年5月.
- 2) 環境省 ダイオキシン類の排出量(排出インベントリー)についての概要版(平成23年度)より引用.
- 3) 「総説 分離変換工学」分離核変換工学専門委員会, 社団法人日本原子力学会, 2004年2月.
- 4) China Institute of Atomic Energy at ASNFC2019 The 5th China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle, Harbin, China, July 2019.
- 5) J. O' M. Bockris, 「エネルギーオプション」, 技報堂出版(株), 1982年7月
- 6) Masaki Ozawa and Mikael Nilsson, "Transmutation of Radioactive Waste into Resource, as Kopernikanische Wendung", 247th ACS National Meeting and Exposition, Industrial and Engineering Chemistry R&D in Processes for Waste Recycling and Metal Recovery" Symposium in Honor of Professor Jan Rydberg", March 18, 2014, Dallas, Texas.
- 7) ギョーム・ピトロン, 「レアメタルの地政学-資源ナショナリズムのゆくえ-」, (株)原書房, 2020年3月.
- 8) Anthony King, Russian invasion of Ukraine shakes global supply chains, CHEMISTR WORLD, pp.5, Vol.19, Issue 4 April 2022.
- 9) ID. Troshkina, et al, "Rhenium Metallurgy" (in Russian), HAYKA, Moscow, 2007.
- 10) Irina Troshkina, Masaki Ozawa, Konstantin E. German, Rare Elements in Nuclear Fuel Cycle (Редкие элементы в ядерном топливном цикле), Monograph in Russian, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, April 2018 ISBN ; 978-5-7237-1600-1.
- 11) 大滝明、原子力レアメタルのポテンシャルと産業利用、六ヶ所・核燃料サイクルセミナー “分離変換技術と資源有効利用への挑戦”、配布資料、スワニー六ヶ所村文化交流プラザ、平成25年10月25日。
- 12) Shinichi Koyama, Tatsuya Suzuki, Masaki Ozawa, "From Waste to Resource, Nuclear Rare Metals as a Dream of Modern Alchemists", Energy Conversion and Management 51, 1799-1805(2010).
- 13) C. Hill, C. Madic, P. Baron, M. Ozawa, Y. Tanaka, "Trivalent minor actinides /lanthanides separation, using Organophosphinic Acids", Journal of Alloys and Compounds 271-273(1998)159-162.
- 14) M. Ozawa, S. Koyama, T. Suzuki and Y. Fuji, "Innovative Separation Method for

- Advanced Spent Fuel Reprocessing Based on Tertiary Pyridine Resin”, The Czechoslovak Journal of Physics, Vol.56, Suppl.D, Part II, pp.D579-587 (2006).
- 15) M. Ozawa, Y. Sano, K. Nomura, Y. Koma, M. Takamashi, “A New Reprocessing System Composed of PUREX and TRUEX Processes for Total Separation of Long-lived Radionuclides”, Proc. 5th International Information Exchange Meeting, pp113-120, Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Nov.1998.
Status and Assessment Report, *ibid.* pp.130, Synthèse des travaux, OECD / NEA, Publication date: May 1999
Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Status and Assessment Report, pp.130, Synthèse des travaux, OECD/NEA, Publication date: May 1999
- 16) 小澤正基, “徹底分析 使用済み核燃料からの有用な稀少金属の活用を考える”, 「エネルギーレビュー」, 2010年5月号, pp.42-46(2010).
- 17) 小澤正基, “先進オリエントサイクルの研究戦略”, 特集-先進オリエントサイクル研究構想の進展を-使用済み燃料からレアメタル・レアアースの分離・回収, 「原子力 eye (Nuclear Viewpoints)」 Vol.56 No.10, pp.7-11(2010年10月号).
- 18) Masaki Ozawa, Yuichi Sano, Chisako Ohara, Takamichi Kishi, “Radioactive Wastes Minimization by Electrolytic Extraction and Destruction in a PUREX-TRUEX Actinide Separation System”, Nuclear Technology, May 2000, Vol.130, No.2, pp196-205 (2000).
- 19) M. Ozawa, M. Ishida, Y. Sano, “Strategic Separation of Technetium and Rare Metal Fission-Products in Spent Nuclear Fuel”, Radiochemistry, 45, No.3, pp.225-232 (2003).
- 20) MASAKI OZAWA, YOSHIHIKO SHINODA, YUICHI SANNO, The Separation of Fission-product Rare Elements Toward Bridging The Nuclear and Soft Energy Systems, Progress in Nuclear Energy Vol.40, No.3-4, pp527-538, 2002.
- 21) 特許 3549865 号「使用済み核燃料中の希少元素 FP の分離回収方法およびこれを利用した原子力発電-燃料電池発電共生システム」小澤正基, 佐野雄一, 篠田佳彦, 登録日 2004/4/30, 米国登録番号 6793799 登録日 2004/9/21, 英国登録番号 2382591 登録日 2005/4/1, 3 仏国登録番号 0208118 登録日 2006/3/3, 露国登録番号 2242059 登録日 2004/12/10.
- 22) Masaki Ozawa, Tatsuya SUZUKI, Shinichi KOYAMA and Yasuhiko FUJII, Separation of Rare Metal Fission Products in Radioactive Wastes in New Directions of Their Utilization, Progress in Nuclear Energy, Vol.47, No.1-4, pp.462-471, 2005.
- 23) HAN Chi Young, OZAWA Masaki, SAITO Masaki, Resourceability on Nuclear Fuel Cycle by Transmutation Approach, SCIENCE CHINA Chemistry (SPECIAL TOPIC: Nuclear Fuel Cycle Chemistry), Vol.55 No.9, pp.1746-1751, September 2012.
- 24) 瀬尾眞治, “アンダーポテンシャル析出と金属腐食反応”, 材料と環境、61, 341-348(2012).
- 25) Masaki Ozawa, Reiko Fujita, Tatsuya Suzuki and Yasuhiko Fujii, ” Separation and

- Utilization of Rare Metal Fission Products in Nuclear Fuel Cycle as for Hydrogen Production Catalysts”, Nuclear Production of Hydrogen, pp355-364, OECD/NEA Third Information Exchange Oct.2005.
- 26) Masaki Ozawa, Akihiko Kawabe, Reiko Fujita, ” Separation and Utilization of Fission Products in Nuclear Fuel Cycle as Hydrogen Production Catalyst”, 水素エネルギーシステム (Journal of the Hydrogen Energy Systems Society of Japan) 特集：近未来の水素製造とコスト, Vol.33, No.1, pp.35-41(2008).
- 27) H.Kita, et al. Denki Kagaku, 38,17 (1970).
- 28) Masaki Ozawa, “Après ORIENT, A New P&T Challenge to Transmute Radioactive Wastes into Resources”, The 2nd China-Japan Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC 2013), Abstract Book, pp64-65, Nov.27- Nov.30 2013, Shanghai, China
- 29) Masaki Ozawa, Après ORIENT cycle, “A Resource-oriented P&T program on Fission Products”, Program and Abstract, 2B-16, pp.98-99, The 3rd Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015), 2nd -5th December,2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- 30) Tsugio Yokoyama, Yuki Tanoue, Atsunori Terashima and Masaki Ozawa, “Production of Rhenium by Transmuting Tungsten Metal in Fast Reactors with Moderator”, 159-165, Vol.10 No.3, Mar., 2016. Journal of Energy and Power Engineering ISSN 1934-8975, USA, David Publishing Company (2016)
- 31) Yuki Tanoue, Tsugio Yokoyama and Masaki Ozawa, ” Resource Evaluation of Heavy Rare Earth Derived from the Spent Gd₂O₃ Burnable Poison in LWRs”, 237-241, Vol.10 No.4, April 2016, Journal of Energy and Power Engineering ISSN 1934-8975, USA, David Publishing Company (2016)
- 32) Atsunori Terashima, Leila Safavi-Tehrani, Mikael Nilsson, Masaki Ozawa, ” Predictive Simulation on Nuclear Transmutation of Rare Earth Elements and Evaluation of the Reliability by Nuclear Analysis of PIE at UC Irvine TRIGA Reactor”, Program and Abstract, 2B-13, pp.92-93, The 3rd Japan-China Academic Symposium on Nuclear Fuel Cycle (ASNFC2015), 2nd -5th December,2015, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- 33) Atsunori Terashima and Masaki Ozawa, “Evaluation of the specific radioactivity of 40 elements created by nuclear transmutation of fission products”, Progress in Nuclear Energy, Vol.93, November 2016, pp.177-185.
- 34) K. V. Rotmanov, A. A. Kozar, et al., ” Production of Metal Ruthenium From Irradiated Technetium” 15th Radiochemical Conference, Booklet of Abstract pp.186, 23-28 April 2006.
- 35) Masaki OZAWA, Hiroyasu HIRANO, Yoshikazu KOMA, Yasumasa TANAKA, Tomio KAWATA, “Enhancing Actinides Separation by Consolidated PUREX and TRUEX processes Intensified by Salt-Free Requisite”, International Conference on Evaluation of

Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems, Proc.of Global'95 Vol.1, pp585-594, Sept. 11~14, 1995, Versailles, France, Palais des Congres (1995).

36) 「フランスの何が優秀か」, (株)サイマル出版会, 1980年11月

37) Mike Sutton, Moon Geochemistry, CHEMISTRY WORLD, Vol.16, Issue 8 pp.52-55 August 2019.

38) 小澤正基, “核燃料サイクルの元素・資源戦略 -現在から将来にわたる核燃料サイクルの方向性に関する考察と提言- ”、核燃料サイクル・放射性廃棄物処理の歴史に関する検証PT、自由民主党本部7F 702号室、平成24年5月25日.

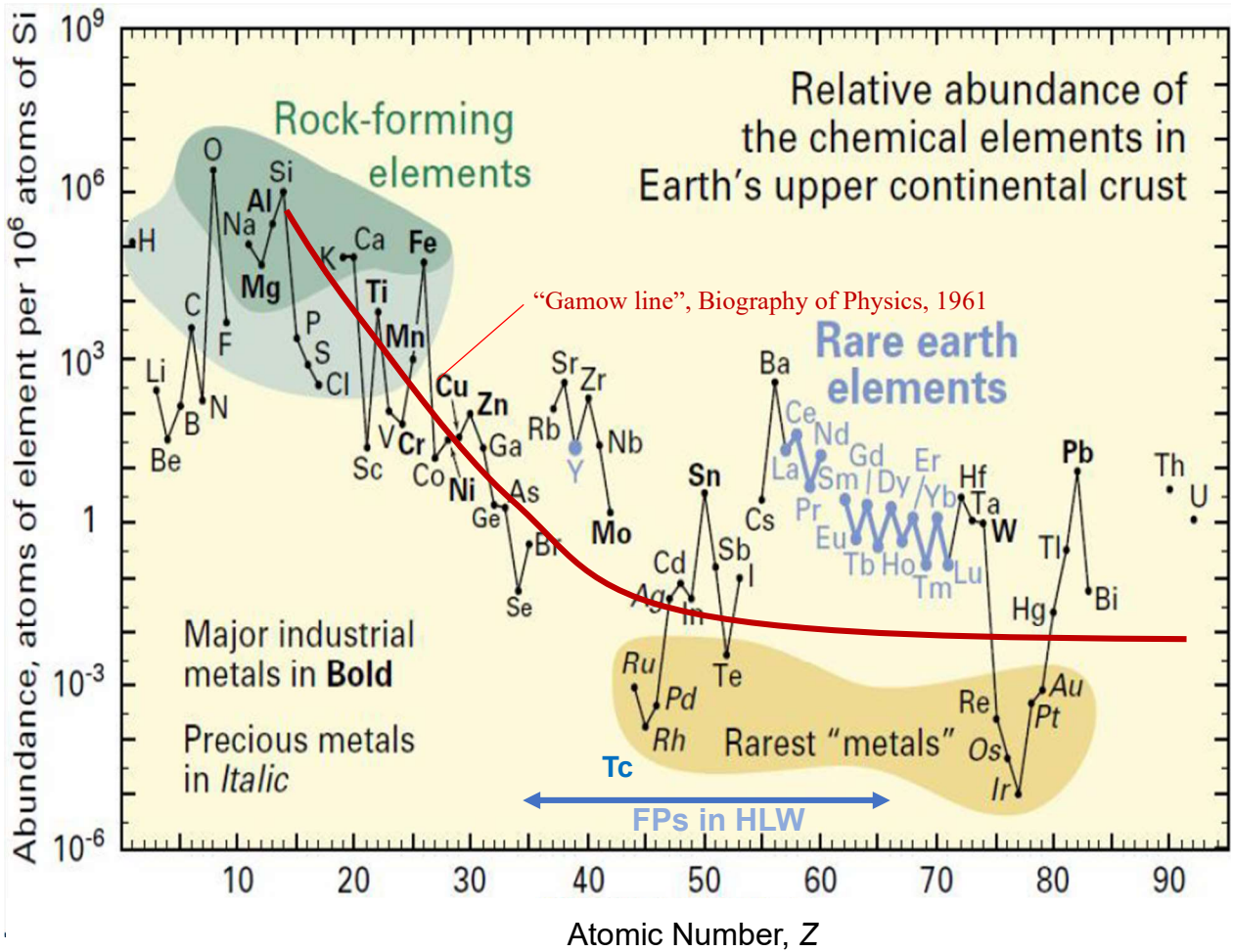


図1 地殻を構成する元素の相対的頻度と高レベル放射性廃液中の核分裂生成物 (Se~Dy)

Jesse Scheuer, "An Introduction to Rare Earths", Molycorp, June 2010

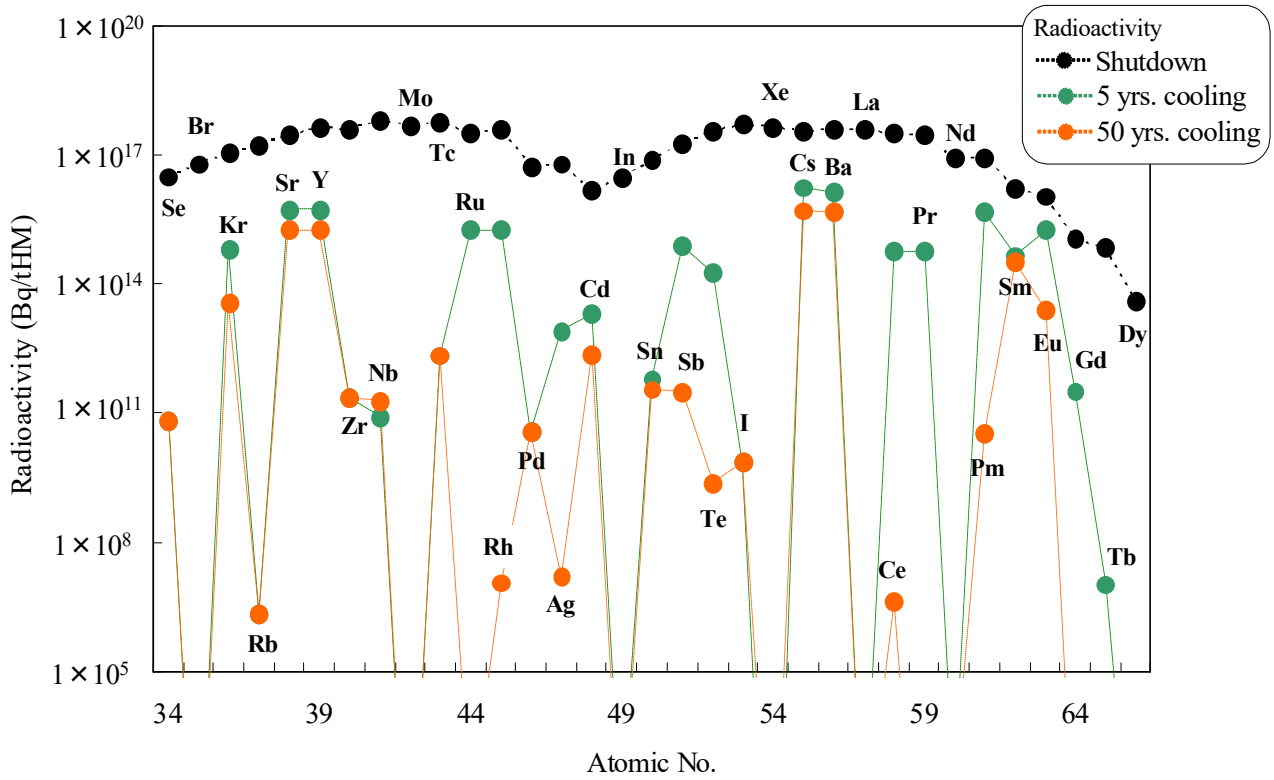


図2 核分裂生成物(FPs)の放射能 (Bq/tHM) の経時変化
 FBR MOX, Inner core, 150GWd/t, cooled 0~50years

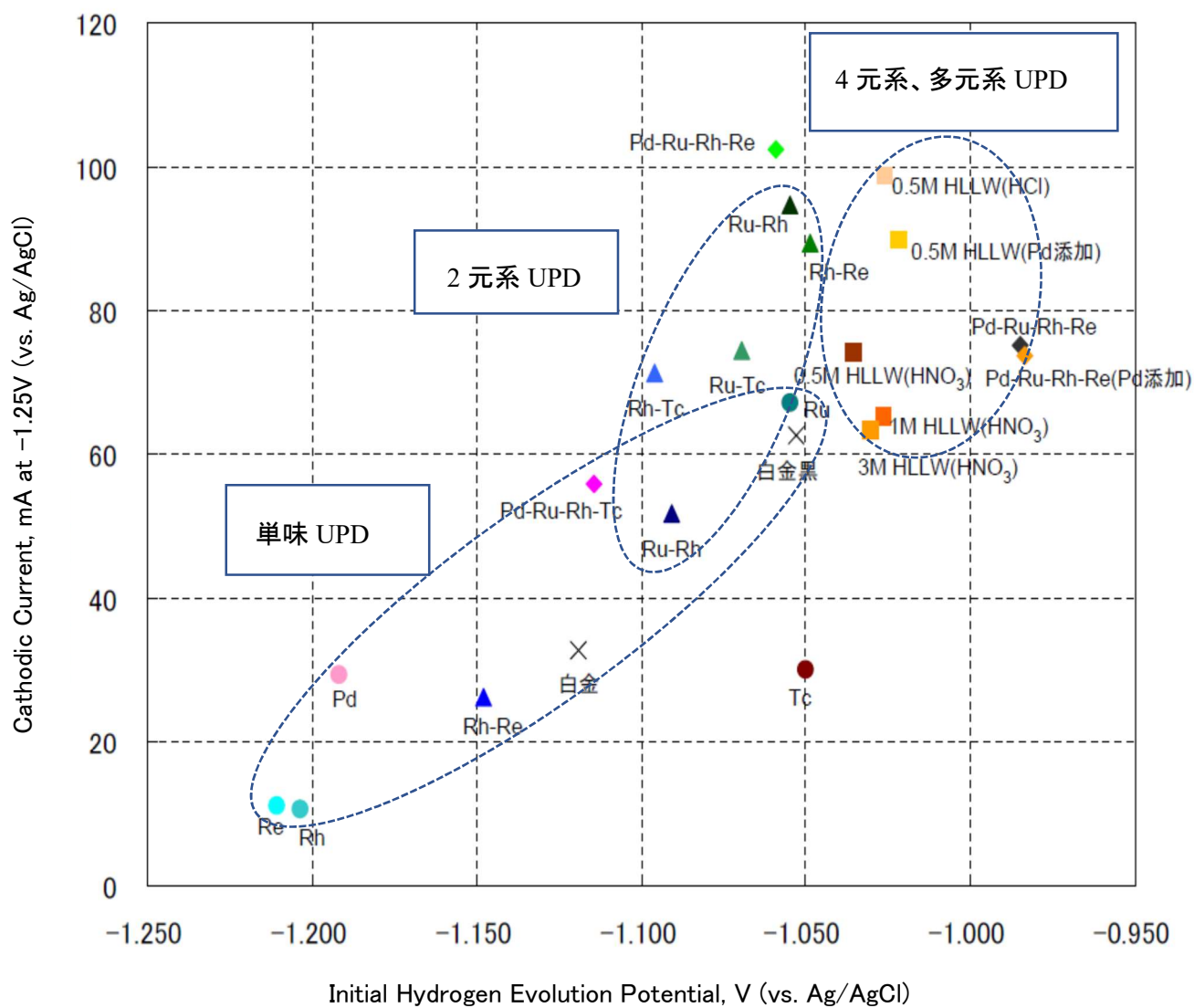


図3 原子カレアメタル UPD 電極の電解水素発生に纏わる触媒活性

Element Strategy on Nuclear Rare Metals

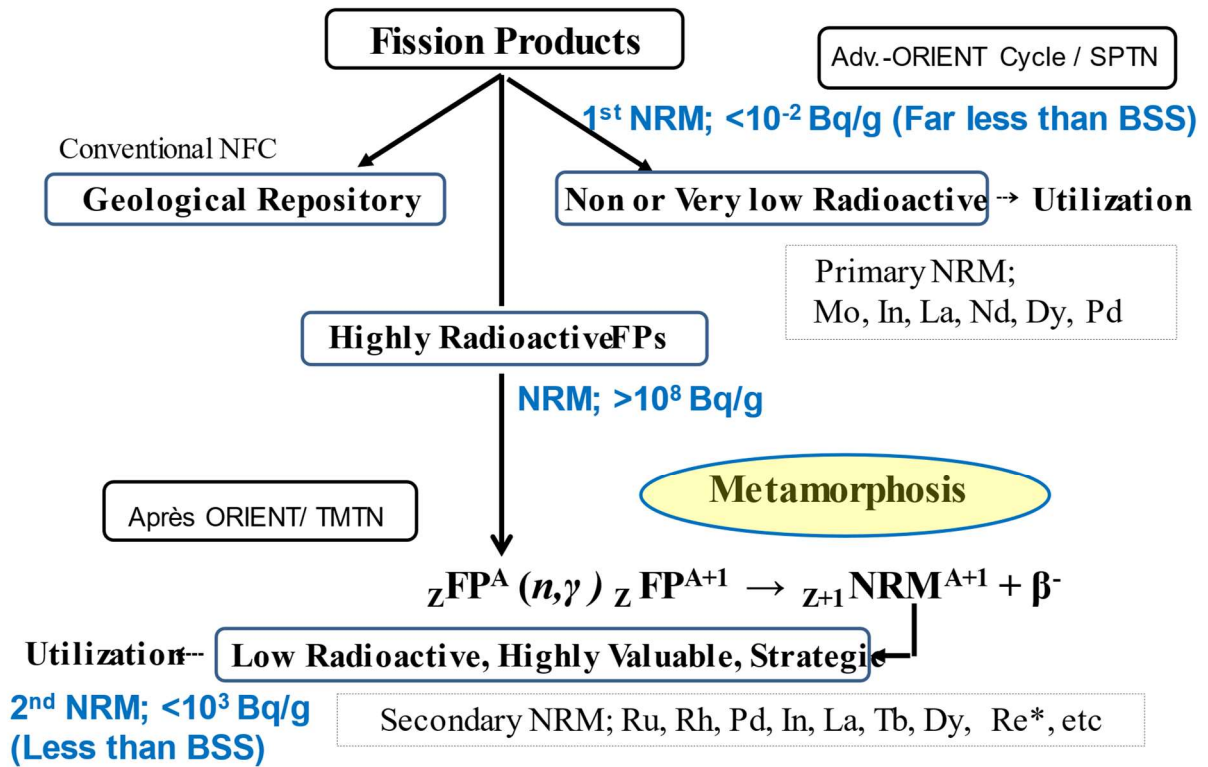


図4 原子力レアメタルの2ステップ元素戦略

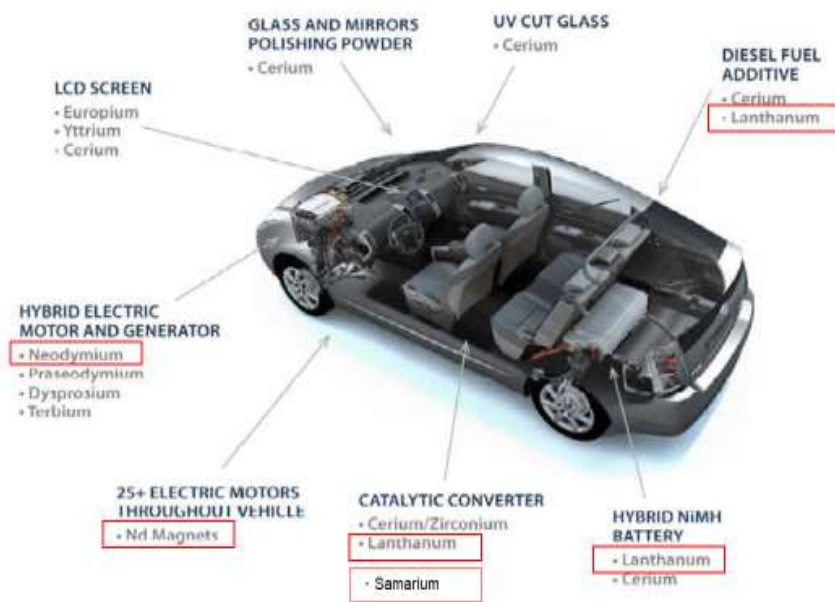


図5 ハイブリッド車の微放射性レアアース (La, Nd, Sm) の利用

表 1 原子力レアメタルの元素変換（数値評価）

EVALUATION INDICES				A	B	C	D	E	F	G
Target Element (T:zFP ^A)	Product Element (P:z+1NRM ^{A+1})			Transmutation Ratio (%/y) (by LWR or FBR); >1%/y	Specific Radioactivity (Bq/g) of T at LWR	Specific Radioactivity (Bq/g) of P at LWR or FBR at 5y Cooling	Reduction Effect of Radioactivity (B/C); >ca.E+2	Required Period (y) for Lowering the E.L. of P ; <5y	Supply Risk on P in Japan ; Hi/Mi/Lo	Strategical importance on P by USDOE, etc
FP	Ba	REE	La	0.0474 (FBR)	1.97E+12	1.11E-02	1.77E+14	0	H	DOE
	La		Ce	0.798 (LWR)	2.05E+02	6.04E+04	3.39E-03	3.5	M	DOE
	Ce		Pr	0.0376 (FBR)	1.94E+11	1.27E+11	1.52E+00	8.7	M	DOE
	Pr		Nd	2.91 (FBR)	4.19E+11	1.63E-05	2.57E+16	0	H	DOE (Highly)
	Nd		Pm	0.0295(FBR)	1.29E-02	N.E			L	N.E
	Pm		Sm	2.67 (LWR)	3.43E+13	2.87E+09	1.19E+04	1600	M	DOE
	Sm		Eu	2.96 (LWR)	1.39E+10	2.06E+12	6.74E-03	400	M	DOE (H)
	Eu		Gd	23.4 (LWR)	1.78E+12	1.36E+08	1.03E+04	13.4	M	
	Gd		Tb	0.613 (FBR)	6.84E+07	1.09E+07	6.27E+00	3600	M	DOE (H)
	Tb		Dy	17.1 (FBR)	9.18E+06	9.93E+04	9.24E+01	2.7	H	DOE (H)
	Dy		Ho	7.44 (LWR)	2.36E+04	1.14E+09	2.07E-05	33250	M	
	Sr		Y	0.0146 (FBR)	2.99E+12	4.28E+15	6.98E-04	2.5	H	DOE (H)
	Mo		Tc	0.373(FBR)	3.40E-01	N.E			N.A	N.A
	Tc		Ru	8.03 (FBR)	6.33E+08	8.06E-02	7.85E+09	0	H	Rarest Metal
	Ru	Rh	0.674 (FBR)	2.71E+11	5.15E+10	5.26E+00	10	H	Rarest Metal	
	Rh	Pd	20.6 (LWR)	1.32E+12	9.51E+01	1.38E+10	0	H	Rarest Metal	
	Pd	Ag	0.584(FBR)	2.89E+06	N.E			L		
Cd	In	In	0.108 (FBR)	9.08E+09	1.16E+01	7.82E+08	0	H	DOE	
Non FP	W	Re,Os	Re	3.05 (LWR)	0	2.59E+03	N.A	0	Hi Strategic	Rarest Metal